

3. Colburn A. P., Hougen O. A. Dialign of cooler condensers for mixtures of vapors with noncondensing gases // Ind. and Engn. Chem. – 1934. – V. 26, No 11. Pp. 1178–1182.

4. Golubev V. G., Brenner A. M., Balabekov O. S. Heat and mass transfer under the film condensation from vapourgas-dust mixtures // Adv. Comp. Meth. In Heat Transfer VII. – Southampton, UK, Boston, USA. 2002. – P. 233–243.

5. Голубев В. Г., Бренер А. М. Особенности пленочной конденсации из запыленной парогазовой смеси // Теор. основы хим. технол. – 2002. – Т. 36, № 2. – С. 141–146.

УДК 669.045

**В. Г. Голубев, А. С. Колесников**

РГП на ПХВ «Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова», г. Шымкент, Республика Казахстан

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ИЗ ЗАПЫЛЕННОЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ**

### **Аннотация**

*В настоящей статье приведены экспериментальные исследования процесса теплообмена и гидродинамики при конденсации паров из запыленной паровой смеси, приведен анализ исследования особенностей конденсации паров из запыленных парогазовых смесей. Полученные результаты проведенных опытов показали, что запыленность наиболее резко снижает коэффициент теплоотдачи в верхней точке вертикально расположенного конденсатора, а по мере удаления от верхней точки влияние запыленности на коэффициент теплоотдачи способствовало уменьшению, ввиду того, что падает тепловая нагрузка и температура смеси. Проведенные опыты показали, что для смеси паров воды с воздухом рабочим диапазоном является температурный перепад порядка 30–50 К. А возрастание начального объемного содержания паров от 0,1 до 0,9 приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи от 50 до 140 Вт/м<sup>2</sup>К, при возрастании содержания паров в парогазовой смеси от 0,3 до 0,9 увеличивается коэффициент массоотдачи в смеси от  $1,2 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup> Па до  $7,5 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup> Па.*

*Ключевые слова:* конденсация паров, запыленная парогазовая смесь, теплообмен, гидродинамика.

### **Abstract**

*In this article summarizes the experimental research of process of heat exchange and hydrodynamics in the condensation of vapors from the dusty steam mix, an analysis of the research on the features of vapor condensation of dusty gas-vapor mixtures. The results of the experiments have shown that dust is most sharply reduces the heat transfer coefficient at the top point of a vertically positioned condenser, and as the distance from the top point, the impact of dust on the heat transfer coefficient contributed to reducing, in view of the fact that drops the heat load and the temperature of the mixture. The tests showed that for a mixture of water vapors with air of the working range of*

*a temperature difference of about 30-50K. And increasing of the initial volume content of vapours from 0.1 to 0.9 leads to the increase of heat transfer coefficients from 50 to 140 W/m<sup>2</sup>K, as the vapour content in the gas mixture from 0.3 to 0.9 increase the rate of mass transfer coefficients in a mixture of  $1,2 \cdot 10^{-9}$  kg/m<sup>2</sup> PA to  $7.5 \cdot 10^{-9}$  kg/m<sup>2</sup> PA.*

*Keywords: condensation. dusty gas-vapor mixture, heat transfer, hydrodynamics.*

Анализ исследования особенностей конденсации паров из запыленных парогазовых смесей показал их актуальность [1–5]. С целью изучения процесса были проведены эксперименты, позволившие не только проверить теоретические результаты, но также идентифицировать режимы конденсации и получить характеристики интенсивности теплообмена при конденсации паров из запыленных парогазовых смесей.

Важный аспект проблемы связан с экспериментально обнаруженным значительным снижением коэффициентов теплоотдачи при конденсации паров из запыленной парогазовой смеси по сравнению с конденсацией паров из гомогенной смеси. Опыты показали, что запыленность наиболее резко снижает коэффициент теплоотдачи в верхней точке вертикально расположенного конденсатора. Затем, по мере удаления от верхней точки, влияние запыленности на коэффициент теплоотдачи уменьшается, поскольку падает тепловая нагрузка и температура смеси. При отсутствии пыли в парогазовом потоке среднее число капель конденсата на единицу поверхности, образующихся на начальном участке, зависит только от смачиваемости и состояния поверхности охлаждаемой стенки (т. е. от поверхностной плотности центров конденсации), но не от теплового потока. Это подтверждается и опытными данными. Однако, при наличии твердой фазы ситуация меняется. Чем больше температура насыщенного пара  $T_v$ , тем меньше критический размер частиц пыли, при котором режим капельной конденсации на начальном участке становится неустойчивым. Если поверхность конденсации содержит налипшие частицы мелкодисперсной твердой фазы, то образование зародышей сильно облегчается и, даже при неполном смачивании, капли конденсата начинают сливаться и растекаться по охлаждаемой поверхности (рис. 1, а и б).

Исходя из известной физической модели, получаем оценку критического (минимального) размера частиц мелкодисперсной твердой примеси в запыленной парогазовой смеси, при котором (т. е. при  $\delta_d \geq \delta_{d(cr)}$ ) происходит стабилизация пленочного режима конденсации на начальном участке:

$$\delta_{d(cr)} = 1,8 \cdot 10^{-2} \frac{2\nu_l \sigma T_v}{\lambda_l (T_v - T_w)^2}$$

Устойчивость пленочного режима на начальном участке может быть нарушена далее вниз по потоку конденсата по мере возрастания его расхода и толщины пленки. При этом визуально наблюдается образование жгутов, «завихрений», участков струйного течения и т. д. [6]. Однако неустойчивость пленки конденсата в этой области чисел Рейнольдса при наличии твердой мелкодисперсной фазы не означает перехода от пленочного к капельному режиму конденсации. Происходит переход от безволновой гладкой пленки к режиму поверхностных волн, что также может сопровождаться возрастанием коэффициентов теплоотдачи. Другой причиной неустойчивости ламинарного безволнового режима пленочной конденса-

ции может быть зависимость вязкости от температуры, а также термокапиллярный эффект, обусловленный зависимостью поверхностного натяжения от температуры [2]. Такой режим также сопровождается возрастанием коэффициентов теплоотдачи. Поэтому именно переход к режиму пленочной конденсации на начальном участке приводит к резкому уменьшению коэффициентов теплоотдачи. Действительно, расчет по известной методике в области условных чисел Рейнольдса  $Re \sim 2,0 \cdot 10^{-2}$  для капельной конденсации дает значения коэффициентов теплоотдачи порядка  $10^3$ , тогда как экспериментально измеренные  $\alpha$  для запыленной парогазовой смеси не превышают по порядку  $10^2$  (рис. 2). Кроме того, при капельной конденсации влияние примеси неконденсирующегося газа на интенсивность теплоотдачи намного сильнее, чем при пленочной конденсации.

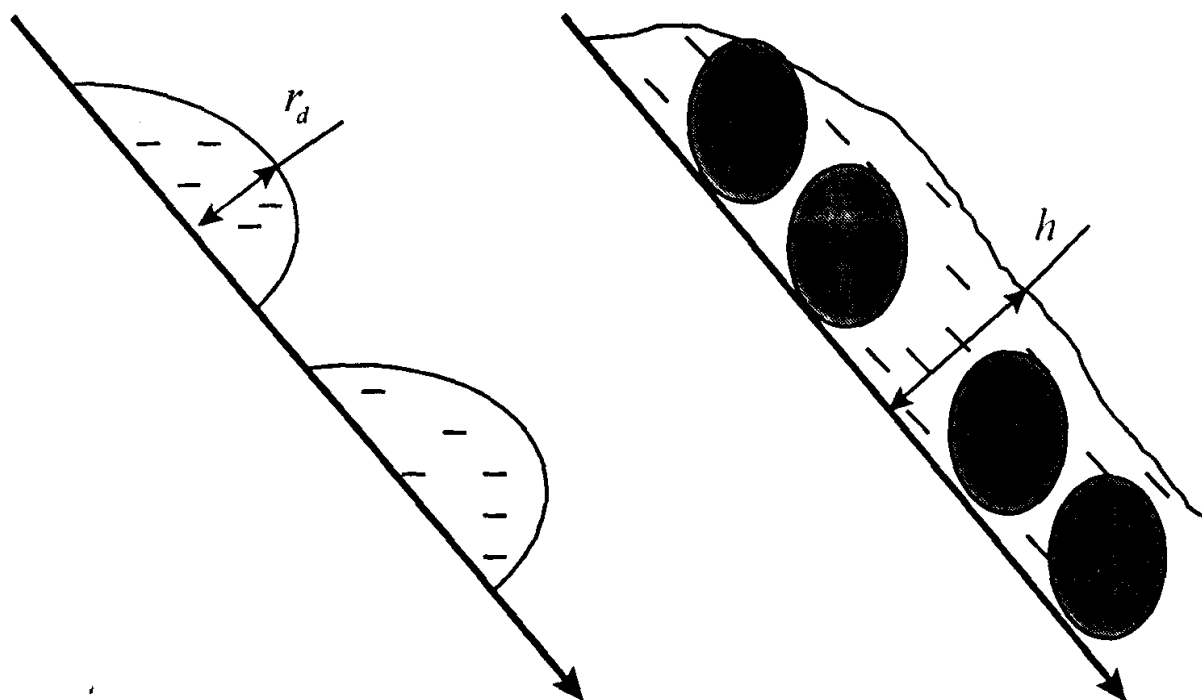


Рис. 1. Начальный участок при конденсации пара на охлаждаемой поверхности:  
чистая парогазовая смесь – а; запыленная парогазовая смесь – б

Теоретический анализ устойчивости пленочного режима течения конденсата за пределами начального участка при конденсации из чистой парогазовой смеси позволяет получить кривую нейтральной устойчивости, отделяющую области устойчивого и неустойчивого режимов течения пленки (рис. 3). В этом случае число Рейнольдса определяется по средней толщине пленки.

Запыленность смеси способствует увеличению коэффициентов массоотдачи, что объясняется увеличением интенсивности объемной конденсации пара на частицах пыли вне пленки конденсата и будет подробно изучено в дальнейшем. Опыты показывают, что для смеси паров воды с воздухом рабочим диапазоном является температурный перепад порядка 30–50К. Влияние объемного содержания паров во входящей в аппарат запыленной парогазовой смеси иллюстрируется графиками на рис. 2. Возрастание начального объемного содер-

жания паров от 0,1 до 0,9 приводило к увеличению коэффициентов теплоотдачи от 50 до 140 Вт/м<sup>2</sup>К. Возрастание содержания паров в парогазовой смеси от 0,3 до 0,9 увеличивает коэффициент массоотдачи в смеси от  $1,2 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup> Па до  $7,5 \cdot 10^{-9}$  кг/м<sup>2</sup> Па (рис. 2).

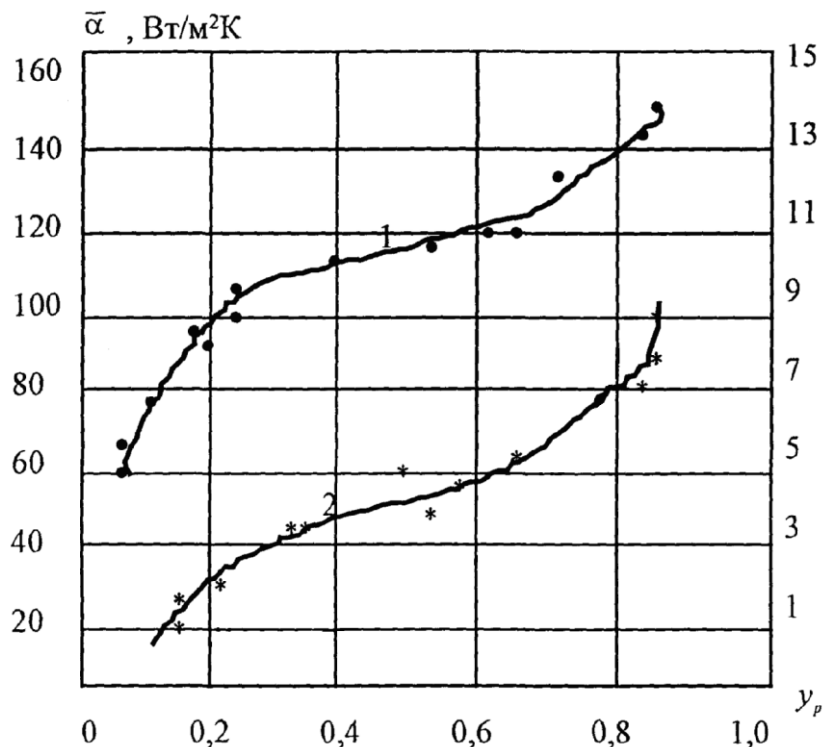


Рис. 2. Зависимость коэффициентов теплоотдачи в запыленной парогазовой смеси от объемного содержания паров конденсации на начальном участке:  
1 – коэффициент теплоотдачи при конденсации паров воды из смеси с воздухом, рассчитанный по входной температуре смеси; 2 – тот же коэффициент, рассчитанный по средней температуре смеси

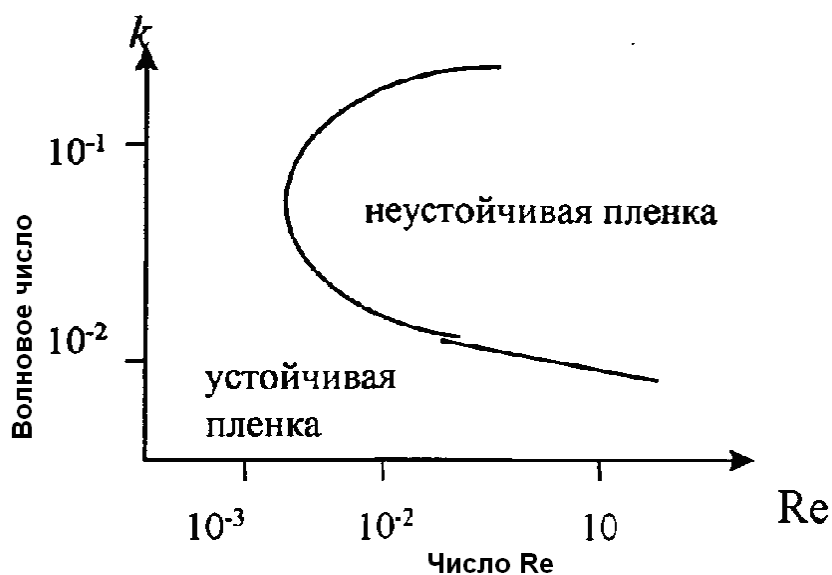


Рис. 3. Диаграмма устойчивости пленочного режима конденсации [7]

Таким образом, наблюдаются вновь более низкие значения коэффициентов теплоотдачи и более высокие значения коэффициентов массоотдачи при возрастании содержания паров в смеси. Увеличение коэффициентов массоотдачи при конденсации объясняется дополнительной конденсацией паров на поверхности частиц пыли в объеме парогазовой смеси. В процессе измерений расхода конденсата трудно отделить конденсат, образовавшийся в виде пленки на поверхности охлаждения, и конденсат, образующийся на поверхности частиц пыли в объеме аппарата. Таким образом, измеренный коэффициент массоотдачи характеризует некоторую суммарную величину потока массы конденсирующегося компонента. Нужно отметить, что в запыленных парогазовых смесях паров воды с воздухом и паров глицерина с воздухом удельный тепловой поток при увеличении температурного напора возрастает в меньшей степени, чем в чистых не запыленных. Так, при увеличении температурного напора от 23 К до 50 К тепловой поток в смеси «воздух – пары воды» возрастал от 320 Вт/м<sup>2</sup> до 1080 Вт/м<sup>2</sup>, а в запыленной – до 870 Вт/м<sup>2</sup>. Аналогичное явление наблюдали при конденсации паров глицерина. Более низкие значения удельного теплового потока в запыленных парогазовых смесях можно объяснить наличием дополнительного сопротивления пленке конденсата при попадании в нее частиц пыли. Значения теплового потока в смеси «воздух – пары глицерина» были приблизительно на 20–25 % выше, чем при конденсации из смеси паров воды с воздухом. Это объясняется более высокой температурой, при которой протекает процесс конденсации паров глицерина.

Таким образом, в представленной работе представлены отдельные результаты экспериментальных исследований и их обсуждение, позволившие получить более полное понимание влияния запыленности как на теплоотдачу, так и на гидродинамику течения вязкой жидкости по наружной вертикальной поверхности теплообменной трубы.

#### Список использованных источников

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. 659 с.
2. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. – Л.: Госхимиздат, 1961. 368 с.
3. Colburn A. P., Hougen O. A. Dialign of cooler condensers for mixtures of vapors with noncondensing gases // Ind. and Engn. Chem. – 1934. – V. 26, No 11. Pp. 1178–1182.
4. Golubev V. G., Brenner A. M., Balabekov O. S. Heat and mass transfer under the film condensation from vapourgas-dust mixtures // Adv. Comp. Meth. In Heat Transfer VII. – Southampton, UK, Boston, USA. 2002. – P. 233–243.
5. Голубев В. Г., Бренер А. М. Особенности пленочной конденсации из запыленной парогазовой смеси // Теор. основы хим. технол. – 2002. – Т. 36, № 2. – С. 141–146.
6. Радев К.Б. Влияние волн на тепломассообмен при пленочной конденсации // Препринт №9, 1989, ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР. 16 с.
7. Krautz W. B., Goren S. Stability of Thin Liquids Films Flowing Down a Plane Ind. Eng. Chem. Found, 1971. V. 10, No. 1. 91 p.